

ЗАВИСИМОСТЬ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ ОТ МАГНИТОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ЛИНЗ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ С ЗАДАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ФОРМЫ ПОЛЮСНЫХ НАКОНЕЧНИКОВ

В. А. Коноваленко, Э. И. Вайсберг, С. Ф. Зелев

Сумы

Магнитные поля, формируемые полюсными наконечниками магнитных линз электронных микроскопов, имеют колоколообразную форму. Распределение магнитной индукции вдоль оси подчиняется закону [1]

$$B_z = \frac{B_0}{1 + \left(\frac{z}{a_v}\right)^2}, \quad (1)$$

где B_0 — максимальное значение магнитной индукции, в сек/м²;
 a_v — полуширина магнитного поля,

$$a_v = \frac{s}{f(\nu) \sqrt{\nu \left(2^{\frac{1}{\nu}} - 1\right) \operatorname{th} \frac{as}{2b}}}, \quad (2)$$

Здесь s — ширина щели полюсного наконечника;

b — внутренний диаметр полюсного наконечника;

a — нуль функции Бесселя, $a = 2,4048$;

ν — характеристический показатель, зависящий от параметра формы полюсного наконечника.

Для исследования взято семь симметричных полюсных наконечников, которые используются в электронных микроскопах ($b_1 = b_2$).

Параметры формы полюсных наконечников различны,

$$P = \frac{s}{b}. \quad (3)$$

Размеры полюсных наконечников следующие:

$$\begin{array}{lll} P_1 = 0,71; & b = 4,2 \text{ мм}; & s = 3 \text{ мм}; \\ P_2 = 0,43; & b = 7,0 \text{ мм}; & s = 3 \text{ мм}; \\ P_3 = 0,95; & b = 4,2 \text{ мм}; & s = 4 \text{ мм}; \\ P_4 = 0,80; & b = 5,0 \text{ мм}; & s = 4 \text{ мм}; \\ P_5 = 0,57; & b = 7,0 \text{ мм}; & s = 4 \text{ мм}; \\ P_6 = 0,83; & b = 12,0 \text{ мм}; & s = 10 \text{ мм}; \\ P_7 = 0,33; & b = 24,0 \text{ мм}; & s = 8 \text{ мм}. \end{array} \quad (4)$$

Пять первых полюсных наконечников используются в объективных линзах, шестой применяется во второй конденсорной линзе и седьмой — в промежуточной линзе электронного микроскопа.

Для исследования зависимости между максимальным значением магнитной индукции и магнитодвижущей силой (количеством ампер-витков) в каждом полюсном наконечнике взяты известные формулы, выражающие

силу линзы через ампер-витки, максимальное значение индукции, полуширину поля [1]:

$$K_v^2 = \frac{0,00352\pi^2}{f^2(v) \sqrt{\left(\frac{1}{2^v} - 1\right)}} \frac{J^2}{U^*}, \quad (5)$$

$$K_v^2 = \frac{0,22 \cdot 10^{11} B_0^2 a_v^2}{U^*}, \quad (6)$$

где K_v^2 — сила линзы в безразмерных величинах;

J — количество ампер-витков;

U^* — ускоряющее напряжение с учетом релятивистской поправки, в ;

a_v — полуширина магнитного поля, м .

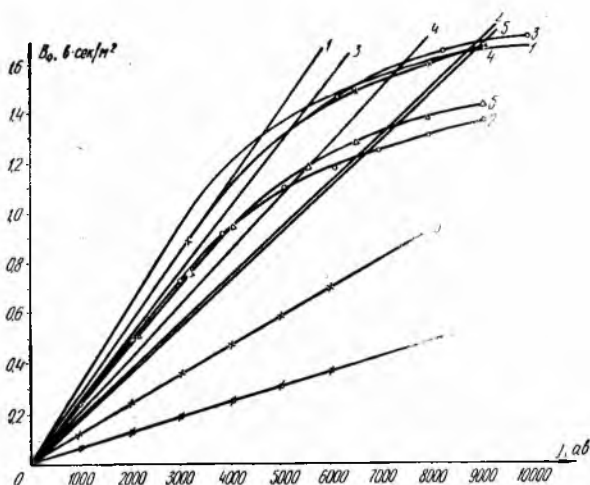


Рис. 1. Зависимость магнитной индукции от магнитодвижущей силы на оси полюсного наконечника:

кривые показывают экспериментальные данные, прямые — расчетные; для случаев 6, 7 эти данные совпадают.

Решив систему уравнений (5) и (6) относительно B_0 и выразив полуширину магнитного поля в миллиметрах, получим

$$B_0 = \frac{12,56 \cdot 10^{-4}}{a_v f(v) \sqrt{\left(\frac{1}{2^v} - 1\right)}} J. \quad (7)$$

Значения величин $f(v)$, $\sqrt{\left(\frac{1}{2^v} - 1\right)}$ в формуле (7) для каждого полюсного наконечника различны и зависят от параметров формы полюсного наконечника [2]. Полуширина магнитного поля определяется по формуле (2). Параметру формы $P_1 = 0,71$ соответствуют значения $f(v) = 2,202$,

$$\sqrt{\left(\frac{1}{2^v} - 1\right)} = 0,863, \quad \text{th} \frac{as}{2b} = 0,6858.$$

Следовательно, подставив эти величины в формулу (2), получим

$$a_v = 2,3 \text{ мм}. \quad (8)$$

Аналогично определяем полуширину магнитного поля для остальных параметров форм полюсных наконечников. После подстановки указанных величин в (2), находим

$$\begin{aligned} P_2 &= 0,43; & a_v &= 3,4 \text{ мм}; \\ P_3 &= 0,95; & a_v &= 2,66 \text{ мм}; \\ P_4 &= 0,80; & a_v &= 2,87 \text{ мм}; \\ P_5 &= 0,57; & a_v &= 3,52 \text{ мм}; \\ P_6 &= 0,83; & a_v &= 7,05 \text{ мм}; \\ P_7 &= 0,33; & a_v &= 10,55 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (9)$$

Пользуясь формулой (7), можно построить семь рабочих формул для определения магнитной индукции, выраженной через ампер-витки, для каждой магнитной линзы в отдельности с фиксированными параметрами формы полюсных наконечников. Для этого нужно в (7) последовательно подставлять значения a_v , $f(v)$,

$V_v \left(2^{\frac{1}{v}} - 1 \right)$, соответствующие заданному параметру формы полюсного наконечника магнитной линзы.

После подстановки получим следующие рабочие формулы:

$$\begin{aligned} 1. B_0 &= 2,87 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 2. B_0 &= 1,87 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 3. B_0 &= 2,56 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 4. B_0 &= 2,34 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 5. B_0 &= 1,86 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 6. B_0 &= 0,951 \cdot 10^{-4} \cdot J; \\ 7. B_0 &= 0,595 \cdot 10^{-4} \cdot J. \end{aligned} \quad (10)$$

Формулы (10) графически представляют прямые линии, тангенсы углов наклона которых зависят от параметров формы полюсных наконечников. Практические замеры магнитной индукции на оси в щелях полюсных наконечников магнитных линз производились датчиком Хола. Результаты замеров показаны на рис. 1 кривыми 1—5 и прямыми 6—7. Из рисунка следует, что результаты теоретических расчетов и экспериментальные данные для полюсных наконечников с параметрами формы $P_6 = 0,83$ и $P_7 = 0,33$ полностью совпадают. Это объясняется тем, что внутренние радиусы и размеры щелей рассматриваемых наконечников велики по сравнению с размерами датчика. Значит, замер магнитной индукции на оси является точным.

В группе полюсных наконечников 1—5 с параметрами формы, указанными на рис. 1, среднее отклонение теоретических данных от экспериментальных составляет 15%, что для сильных магнитных линз следует

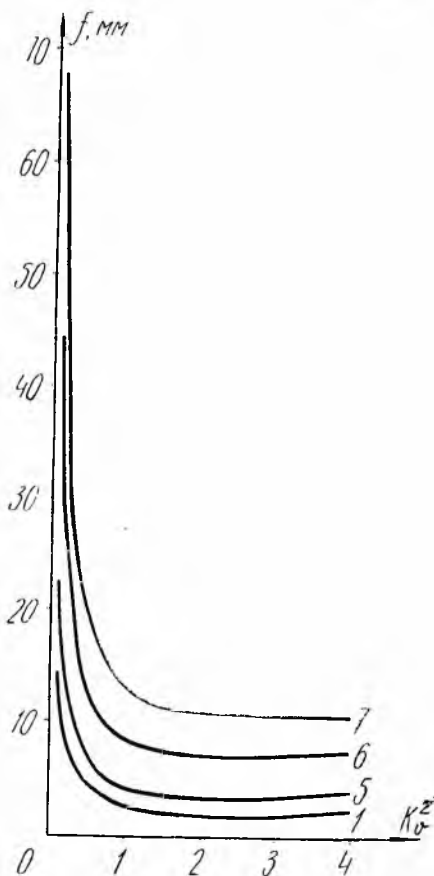


Рис. 2. Фокусное расстояние как функция силы линзы K_v^2 для полюсных наконечников с параметрами формы:

$$\begin{aligned} 1 - p &= 0,71; & 5 - p &= 0,57; \\ 6 - p &= 0,83; & 7 - p &= 0,38. \end{aligned}$$

считать нормальным. Несовпадение теоретических данных с экспериментальными (до точек насыщения) для случаев 1—5 объясняется тем, что теоретические данные отражают значения магнитной индукции в точке на оси полюсного наконечника, а экспериментальные — значение магнитной индукции на некотором участке, ограниченном размерами датчика.

Изменение фокусного расстояния в зависимости от силы линзы для случаев 1, 5, 6, 7 формулы (10) показано на рис. 2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Глазер. Основы электронной оптики (перевод с нем.). Гостехиздат, 1957.
 2. В. А. Коноваленко. «Оптико-механическая промышленность», 1963, № 1.
-